

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Energetika a napájení Letiště Ostrava

Power Supply of Ostrava Airport

2011

Pavel Navrátil

Prohlášení o autorství diplomové práce

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě 06.05.2011

.....

Pavel Navrátil

Poděkování

Zejména bych chtěl poděkovat, vedoucímu mé diplomové práce panu Doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému, za cenné rady a připomínky, které mi během zpracovávání práce poskytl.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá lokální distribuční sítí Letiště Ostrava a.s. V teoretické části je proveden rozbor distribučních sítí a parametrů vedení. Dále je popsána problematika přechodu sítě na vyšší napěťovou hladinu a také omezení činných ztrát na vodičích v důsledku přechodu na vyšší napěťovou hladinu. Další kapitola obsahuje výpočet zkratových poměrů dle ČSN 60909-0 .

V praktické části práce je popsána distribuční síť Letiště Ostrava. Jsou provedeny výpočty zkratových poměrů v jednotlivých rozvodnách letiště a vyčísleny ztráty při provozu kabelů na různých napěťových hladinách. V závěru práce jsou doporučení pro další rozvoj distribuční sítě Letiště Ostrava a.s.

Klíčová slova

Letiště Ostrava a.s, lokální distribuční síť, zkratový proud, zkratový výkon, rozvodna.

Abstract

This Master thesis presents local distribution network of the Letiště Ostrava a.s. (The Ostrava Airport Company). The theoretical part provides an analysis of the distribution network and wiring parameters. The area of the network transition to a higher voltage level and restrictions of operating losses of conductors caused by the network transition to a higher voltage level are described. The following chapter includes calculations of short circuit ratios according to the Czech technical standard ČSN 60909-0.

The practical part describes the Letiště Ostrava distribution network. The calculations of short circuit ratios in individual airport substations are presented and losses during operation of cables on different voltage levels quantified. The concluding section of the thesis offers recommendations for the future development of the Letiště Ostrava, a.s. distribution network.

Keywords

Ostrava Airport, the local distribution network, short-circuit, short circuit power, substation.

Seznam použitých zkratk a symbolů

ΔP	ztráty činného výkonu [W]
ΔQ	ztráty jalového výkonu [VAr]
ΔS	ztráty zdánlivého výkonu [VA]
ΔU	úbytek napětí
ANTKOYPV	druh kabelu
AXEKVCEY	druh jednožilového kabelu
B	kapacitní susceptance [S]
BEZ	výrobce transformátorů
C	kapacita vedení [F]
C_{6kV}, C_{22kV}	cena elektrické energie
CEPS	provozovatel přenosové soustavy
C_{MAX}	koeficient pro výpočet maximálního zkratového proudu
C_{MIN}	koeficient pro výpočet minimálního zkratového proudu
$\cos\varphi$	účinník
F_k	síla mezi vodiči [N]
G	svod vedení [S]
i_{dc}	stejnosměrná složka zkratového proudu [A]
I_k „	počáteční souměrný rázový zkratový proud [A]
I_{k1} „	jednofázový souměrný zkratový proud [A]
I_{k2} „	dvoufázový souměrný zkratový proud [A]
I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}	proudy v jednotlivých fázích obvodu [A]
LDS	lokální distribuční síť
I_N	proud kabelem [A]
I_{NC}	činný proud kabelem [A]
I_{NJ}	zdánlivý proud kabelem [A]
i_p	nárazový zkratový proud [A]
K_T	korekční činitel transformátoru
nn	nízké napětí
P_i	instalovaný výkon [W]
P_p	instalovaný příkon [W]
R_L	elektrický odpor vedení [Ω]
\vec{S}	vektor 3 fázového zdánlivého výkonu [VA]
S_{ks}	počáteční zkratový výkon [VA]
S_{MIN}	minimální průřez kabelu [mm]

TR1 a TR2	označení transformátorů
TR1HAL	značka transformátoru
U_N	napájecí napětí [V]
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
W_e	přirozený výkon vedení [W]
X_c	kapacitní reaktance [Ω]
$X_d^{\prime\prime}$	reaktance synchronních motorů [Ω]
X_L	induktivní reaktance [Ω]
Y	admitance vedení [S]
Z_0	netočivá zkratová impedance [Ω]
Z_1	sousledná zkratová impedance [Ω]
Z_2	zpětná zkratová impedance [Ω]
Z_L	impedance vedení [Ω]
Z_Q	impedance síťového napáječe [Ω]
Z_R	impedance reaktoru [Ω]
Z_T	impedance transformátoru [Ω]
β	činitel soudobosti
W_{6kV}, W_{22kV}	spotřeba elektrické energie

OBSAH

1 Úvod.....	- 9 -
2 Rozbor provozu distribučních sítí venkovních i kabelových.....	- 10 -
2.1 Rozvod elektrické energie	- 10 -
2.2 Distribuční rozvodná síť.....	- 11 -
2.3 Druhy sítí.....	- 12 -
2.4 Elektrické parametry vedení.....	- 14 -
2.5 Dimenzování sítí vn.....	- 17 -
3 Omezení ztrát a optimalizace změnou napěťové hladiny	- 18 -
3.1 Ztrátový výkon	- 18 -
3.2 Ztráty v transformátoru	- 18 -
3.3 Změna napěťové hladiny	- 20 -
3.4 Základní hlediska návrhu nové sítě	- 20 -
3.5 Ztráty v navrhované síti.....	- 21 -
3.6 Vztah úbytku napětí ke ztrátám v navrhované síti	- 22 -
3.7 Charakteristické změny v síti při přechodu na vyšší napěťovou hladinu	- 24 -
4 Kontrola odolnosti vůči zkratovým proudům	- 25 -
4.1 Metodika výpočtů zkratů dle ČSN EN 60909-0.....	- 26 -
4.2 Předpoklady výpočtu	- 26 -
4.3 Metoda výpočtů – Ekvivalentní zdroj v místě zkratu.....	- 27 -
4.4 Použití souměrných složek	- 27 -
4.5 Určení maximálního zkratového proudu	- 28 -
4.6 Určení minimálního zkratového proudu.....	- 28 -
4.7 Výpočet parametrů soustavy	- 29 -
4.8 Výpočet zkratových poměrů.....	- 31 -
4.9 Počáteční souměrný rázový zkratový proud $I_{k, ''}$	- 32 -
4.10 Nárazový zkratový proud i_p	- 33 -
4.11 Stejnosečná složka zkratového proudu $i_{d,c}$	- 34 -
5 Letiště Ostrava a.s.	- 35 -
5.1. Představení letiště.....	- 35 -
5.2 Současný stav LDS.....	- 35 -
5.3 Parametry sítě Letiště Ostrava a.s	- 37 -
5.4 Výpočet zkratových poměrů LDS	- 42 -
5.5 Porovnání ztrát v kabelech při různých napěťových hladinách.....	- 52 -
5.6 Návrh úprav LDS	- 57 -
6 Závěr a zhodnocení	- 59 -
Použitá literatura.....	- 61 -
Seznam příloh	- 62 -

1 Úvod

Elektrická energie je součástí našeho každodenního života. Hlavní výhodou elektrické energie je fakt, že ji lze získat z mnoha zdrojů a následně přeměnit na jinou formu energie. Její neustále větší spotřeba vede ke snaze zvyšovat kapacitu distribuční sítě a omezit ztráty vznikající přenosem elektrické energie.

V této diplomové práci jsou teoreticky popsány používané distribuční sítě a napěťové hladiny v České republice. Další kapitoly jsou věnovány elektrickým parametrům vedení, dimenzování vedení a omezení ztrát změnou napěťové hladiny. Důležitou kapitolou je kapitola věnující se kontrole odolnosti vůči zkratovým proudům a popisující výpočet zkratových proudů pomocí normy ČSN EN 60909-0.

Praktická část diplomové práce je věnována Letišti Ostrava a.s. Je analyzován současný stav lokální distribuční sítě, jsou provedeny výpočty zkratových poměrů a ztrát v kabelech při provozu na různých napěťových hladinách a následně jsou vypracována doporučení pro lokální distribuční síť Letiště Ostrava a.s.

2 Rozbor provozu distribučních sítí venkovních i kabelových

2.1 Rozvod elektrické energie

Důležitým mezníkem v rozvoji užívání elektrické energie v České republice bylo ustavení zákona o elektrifikaci v roce 1919, kdy se stát stal hlavním nositelem soustavné elektrifikace. Pro celou tehdejší republiku byla normalizována trojfázová soustava s kmitočtem 50 Hz a s napětím 380/220 V, 22 kV, 110 kV pro distribuční sítě a 6kV pro napětí generátorů.

Další rozvoj elektrizační soustavy ČSR nastává po roce 1945, kdy byly sjednoceny všechny podniky zabývající se výstavbou elektrického zařízení a objektů a rozvodem elektrické energie. Tím byly vytvořeny podmínky pro vznik jednotné elektrizační soustavy a došlo k výstavbě hlavní přenosové soustavy nejdříve o napětí 110 kV, později (r. 1950) o napětí 220 kV a dále (po r. 1962) o napětí 400 kV. Síť o napětí 400 kV byla dále rozvíjena a v současné době tvoří nadřazený systém.(obr. č. 1) [1]

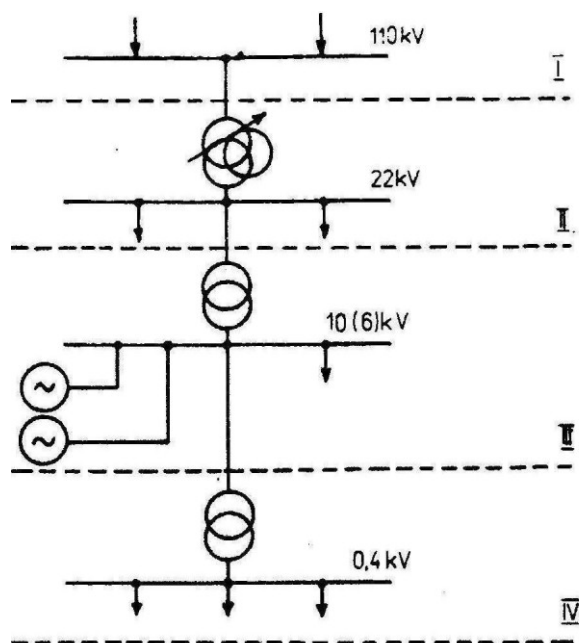


Obr. č. 1 Přenosová síť České republiky 400 a 220kV [9]

Přenosová elektrizační soustava České republiky (ČEPS) je jednou z nejspolehlivějších v Evropě. Od 19. 12. 2009 je členem organizace ENTSO-E (bývalá UCPTE). ČEPS je jedním ze subsystémů elektrizační soustavy České republiky, který propojuje významné subjekty (elektrárny, velké podniky, města, apod.) v elektrizační soustavě a zajišťuje také zahraniční spolupráci v rámci ENTSO-E. ČEPS zajišťuje přenos elektřiny, dispečerské řízení, provoz a rozvoj přenosové soustavy České republiky. Distribuční část soustavy České republiky mají ve vlastnictví tři subjekty.

2.2 Distribuční rozvodná síť

Distribuční soustava slouží k přenosu a rozvodu elektrické energie z místa, kde se vyrábí, až do místa spotřeby. Je složena obvykle ze soustav přenosových a soustav distribučních. Distribuční soustavy mají za úkol rozdělit elektrickou energii z napájeného bodu (uzlu) do jednotlivých spotřebičů nebo skupin, popřípadě k jednotlivým spotřebičům. Veřejné rozvodné soustavy napájí byty, občanskou vybavenost, tzv. terciální sféru. Napájíme z nich i průmyslové, zemědělské a dopravní distribuční sítě. Podle napěťových hladin můžeme distribuční síť rozdělit viz: obr. č. 2

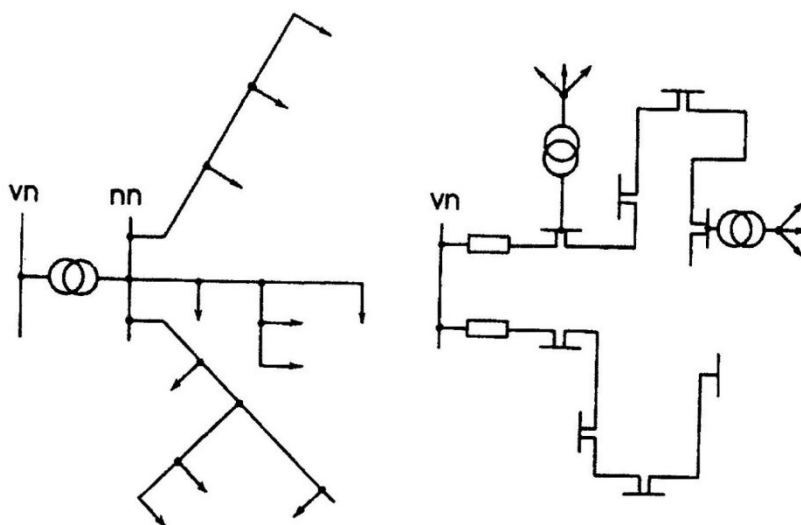


Obr. č. 2 Napěťové hladiny

2.3 Druhy sítí

- Sítě paprskové radiální

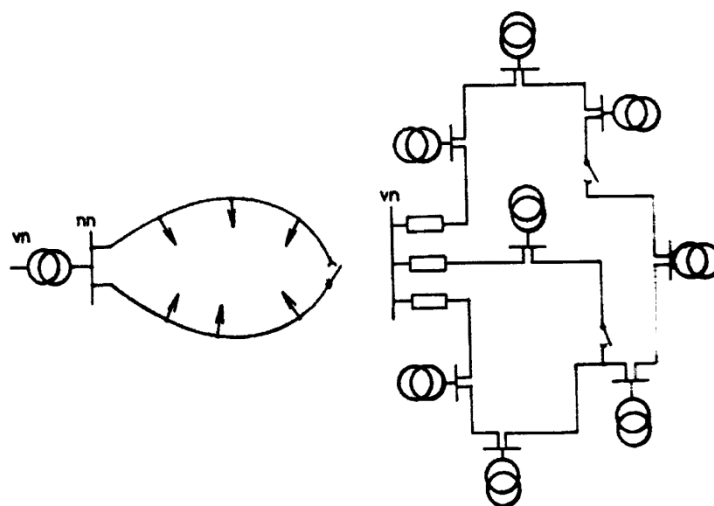
Vedení vychází z transformovny a zásobuje jednotlivé odběry. Každý paprsek je samostatný a paprsky nelze vzájemně spojovat. Tento systém je nejlevnější, ale jistota dodávky je nejmenší. Používá se v malých městech. Na obr. č. 3 jsou znázorněny paprskové sítě pro nízké a vysoké napětí.



Obr. č. 3 Paprskové sítě

- Sítě okružní

Jednotlivé polosmyčky jsou vedeny s možností sepnutí ve spínacích trafostanicích. Obvykle se provozují rozepnuté, tedy jako paprskové. Sítě okružní jsou dražší než paprskové pro větší délku nezbytných vedení, avšak jsou provozně jistější. Provoz rozepnutých okružních sítí je přehledný a nenáročný. Používá se v praxi pro všechny hladiny napětí nn, vn a vvn. Na obr. č. 4 je příklad okružních sítí.



Obr. č. 4 Okružní síť

- Sítě mřížové

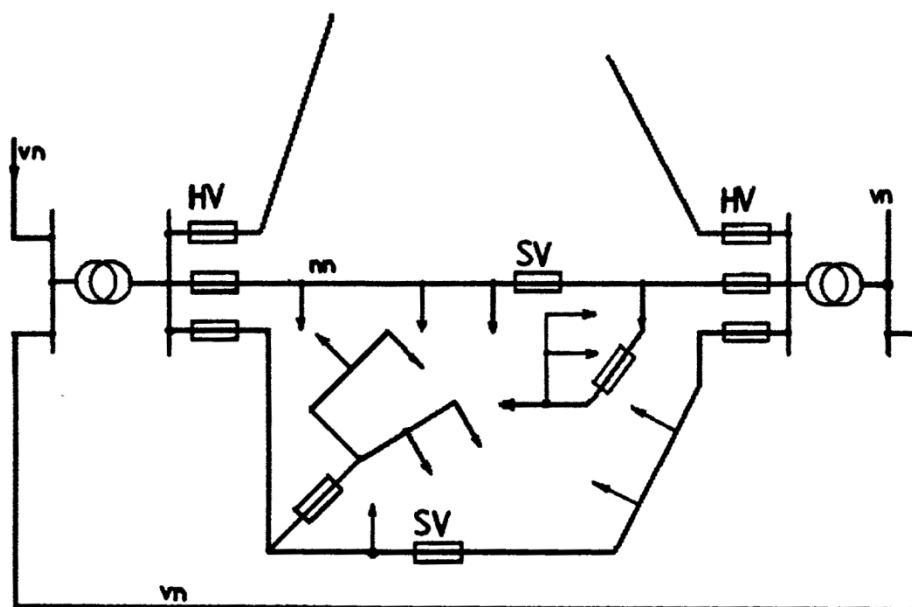
Používají se převážně u nn kabelových sítí, v některých případech i u vn sítí.

Zjednodušená mřížová síť

Zjednodušená mřížová síť je vlastně sepnutá okružní síť. Tyto sítě jsou sestaveny a jištěny tak, aby se vadný úsek selektivně odpojil pojistkami. Ostatní síť musí zůstat v provozu. Zjednodušenou mřížovou síť lze vytvořit tehdy, pracují-li do společné sítě alespoň dva transformátory obr. č. 5. Mezi těmito napájecími body je spojení s hlavním vedením s většími průřezy, jištěné výkonovými pojistkami. V místě kritického průřezu jsou umístěny tzv. pojistky slabé vazby, které mají odpojit úsek v poruše před pojistkami hlavními. Poměr jmenovitých proudů pojistek hlavní vazby a slabé vazby je dva ku jedné. Distribuční transformovny vn/nn jsou napájeny jedním venkovním vedením vn, případně dvěma při okružním systému vn.

Klasická mřížová síť

Klasické mřížové sítě jsou sítě pro napájení větších měst s hustotou $\sigma = 1 \text{ MW.km}^{-2}$. Mřížová síť je napájena více napáječi vn. Její výhody jsou především v provozní jistotě, lepší využití transformátorů, menší ztráty a kolísání napětí. Nejčastěji se provádějí jako kabelové sítě nn. Nevýhodou jsou vyšší zkratové proudy. Pro výkony transformátoru do 315 kVA jistíme výkonovými pojistkami vn, u větších výkonů pak výkonovými odpínači.



Obr. č. 5 Mřížová síť [3]

2.4 Elektrické parametry vedení

Odpor vedení (R)

Činný odpor vedení je závislý na materiálu vedení. Odpor vedení je přímo úměrný měrnému odporu vedení a délce vedení, nepřímo jeho průřezu.

$$\text{Vypočítá se: } R = \frac{\rho \times L}{S} \quad [\Omega] \quad (1)$$

ρ = měrná rezistivita, $[\Omega]$

L = délka vedení, $[m]$

S = průřez $[mm^2]$

Činný odpor se udává při určité teplotě ($20^\circ C$), je totiž teplotně závislý. Pro vodiče platí, že odpor s rostoucí teplotou roste a naopak. Tuto závislost zohledňuje teplotní součinitel odporu α .

Indukčnost (L)

Indukčnost vedení je míra schopnosti vedení indukovat při změně jím protékajícího proudu napětí, které působí proti této změně. Představuje zpětný vliv magnetických polí proudu na vedení. Proud se zpožďuje za napětím.

Kapacita (C)

Je míra schopnosti vodičů nahromadit elektrický náboj. Provozní (úhrnná) kapacita vodiče se skládá z částečné kapacity vodiče proti zemi a ze vzájemné kapacity mezi vodiči.

$$C = \frac{Q}{U} \quad [\text{F}] \quad (2)$$

Svod (G)

Vzniká nedokonalostí izolace a způsobuje ztráty elektrické energie. Ztráty svodem mají činný charakter a u venkovních vedení jsou způsobeny zejména mechanickým znečištěním izolátorů, vlhkem, deštěm. Svod je převrácená hodnota odporu.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{S}{\rho \times L} \quad [\text{S}] \quad (3)$$

Činný odpor a indukčnost vedení jsou rozloženy rovnoměrně po celé délce vedení a nazývají se parametry podélné. Jejich vliv závisí na velikosti proudu a způsobují úbytek napětí na vedení.

Kapacita a svod jsou rozloženy napříč mezi vodiči a nazývají se parametry příčné. Jejich vliv závisí na velikosti napětí a způsobují úbytek proudu ve vedení.

Odvozené parametry vedení

Induktivní reaktance (X_L)

určuje vztah mezi proudem a napětím v obvodu, obsahujícím jen ideální indukčnost. Je definována jako součin úhlového kmitočtu a indukčnosti:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad [\Omega] \quad (4)$$

Kapacitní reaktance (X_C)

Určuje vztah mezi proudem a napětím v obvodu, obsahujícím jen ideální kapacitu. Je definována jako převrácená hodnota součinu úhlového kmitočtu a kapacity:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad [\text{S}] \quad (5)$$

Kapacitní susceptance (B)

Je synonymum pro kapacitní vodivost vedení, která je převrácenou hodnotou kapacitní reaktance vedení.

$$B = \frac{1}{X_C} = 2\pi f C \quad [S] \quad (6)$$

Podélná impedance vedení (Z)

Je jedním z komplexních parametrů vedení. Skládá se z odporu vedení a indukční reaktance vedení, které se obvykle udávají na kilometr délky vedení:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad [\Omega] \quad (7)$$

Odpor a induktivní reaktance jsou v sérii

Příčná admitance vedení (Y)

Je jedním z komplexních parametrů vedení. Skládá se ze svodu vedení a kapacitní reaktance vedení, které se obvykle udávají na kilometr délky vedení:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad [S] \quad (8)$$

Svod a susceptance jsou paralelně.

Přirozený výkon vedení

Elektrický výkon, při jehož přenosu se rovná energie magnetického pole vedení energii jeho pole elektrického. V kapacitě vedení se mění periodicky kapacitní jalová elektrická energie na energii elektrického pole.

$$W_E = \frac{1}{2} C U^2 \quad (9)$$

V indukčnosti vedení se střídavě mění indukční jalová elektrická energie na energii magnetického pole.

$$W_M = \frac{1}{2} L I^2 \quad (10)$$

$$P_P = \frac{U^2}{Z_V} \quad Z_V = \sqrt{\frac{X_K}{B_K}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (11)$$

Kde Z_V (vlnová impedance) se rovná impedanci zátěže na konci vedení. (Z_V venkovních vedení = 300–350 Ω ; Z_V kabelových vedení = 35–45 Ω)

Když se vedením přenáší výkon větší než přirozený, je napětí na konci menší než na začátku.

Když se přenáší výkon menší než přirozený, je napětí na konci vedení větší než na začátku.

Při přenosu přirozeného výkonu se napětí na konci a na začátku rovnají.

2.5 Dimenzování sítí vn

Distribuční (rozvodná) elektrická síť musí vyhovovat níže uvedeným parametrům:

- úbytek napětí musí být v povolené toleranci
- výkonové ztráty nesmí překročit povolenou mez
- snášet oteplení provozním proudem
- odolat mechanickému namáhání
- splňovat podmínky pro ekonomický provoz
- vyhovět nárokům na bezpečnost provozu
- spolehlivost dodávky elektrické energie

Dimenzování vodičů ovlivňuje více faktorů, jako např: provozní napětí, izolační hladina, vlivy na sdělovací zařízení apod. V důsledku těchto parametrů může docházet ke změnám průřezu vodičů.

Dovolené odchylky napěťových hladin

NN	$\pm 10\%$
VN	$\pm 10\%$
VVN-110 kV	$\pm 10\%$
VVN- 220kV	$\pm 10\%$
ZVN- 400 kV	$\pm 5\%$

Tabulka č. 1 Dovolené odchylky napěťových hladin [7]

3 Omezení ztrát a optimalizace změnou napěťové hladiny

3.1 Ztrátový výkon

Hodnota ztrát v rozvodu elektrické energie je velmi důležitým ukazatelem hospodárnosti provozu. Činné ztráty způsobují oteplení vodičů. Tyto ztráty můžeme vyjádřit vztahem:

$$\bar{S} = 3 \cdot \bar{U} \cdot \bar{I}^* = 3 \cdot (R + jX) \cdot I \cdot \bar{I}^* = 3 \cdot R \cdot I^2 + jX \cdot I^2 \text{ [VA, V, } \Omega, \text{ A]} \quad (12)$$

Úpravou dostaneme

$$\Delta S = 3 \cdot R \cdot I^2 + j3 \cdot X \cdot I^2 = \Delta P + j\Delta Q \text{ [VA; W, Var]} \quad (13)$$

Následně upravíme a dostaneme výsledný vztah pro činné ztráty

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot (I_c + I_s)^2 \text{ [W; } \Omega; \text{ A]} \quad (14)$$

Kde:

\bar{S} vektor třífázového zdánlivého výkonu [VA]

\bar{U} vektor fázového napětí [V]

\bar{I}^* vektor komplexně sdruženého zdánlivého proudu [A]

I_c činná složka proudu [A]

I_s jalová složka proudu [A]

ΔS ztráty zdánlivého výkonu [VA]

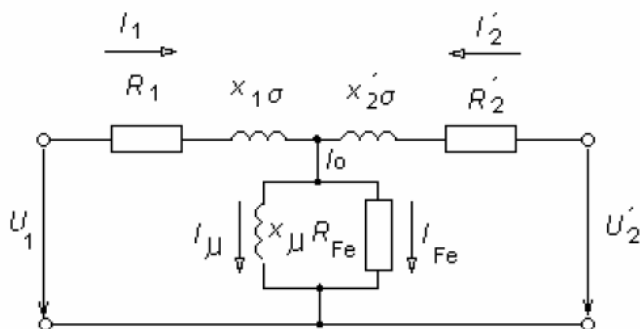
ΔP ztráty činného výkonu [W]

ΔQ ztráty jalového výkonu [VAr]

3.2 Ztráty v transformátoru

Transformátory jsou součástí každého rozvodu elektrické energie, proto se ztrátami v transformátorech musíme zabývat v souvislosti se ztrátami v rozvodu elektrické energie. Vyjadřujeme jak ztráty činné, tak i ztráty jalové. Ty se rozlišují na ztráty naprázdno a nakrátko. Činné ztráty naprázdno ΔP_0 považujeme za stálé ztráty, tuto hodnotu získáme

z atestu transformátoru. Obdobně získáme i hodnotu jmenovitých ztrát nakrátko ΔP_{KN} , tyto ztráty jsou závislé na zatížení transformátoru.



Obr. č. 6 Náhradní schéma transformátoru

Běžně určujeme ztráty ve vinutí z celkových ztrát zjištěných nakrátko:

$$\Delta P_V = \Delta P_{KN} \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 = \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \Delta P_{KN} \text{ [kW; kW; A; kVA]} \quad (15)$$

Kde:

S – zdánlivý maximální provozní příkon transformátoru pro období kdy počítáme ztráty [VA]

S_n – jmenovitý příkon transformátoru [VA]

I – provozní proud transformátoru [A]

I_n – jmenovitý proud transformátoru [A]

Celkové činné ztráty transformátoru:

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \cdot \Delta P_{KN} \text{ [kW; kW; kVA]} \quad (16)$$

Kde:

ΔP_T - celkové činné ztráty transformátoru [W]

ΔP_{KN} - ztráty nakrátko [W]

ΔP_0 - ztráty naprázdno [W]

Celkové jalové ztráty v transformátoru:

$$\Delta Q_T = \frac{i_0}{100} \cdot S_N + \frac{u_k}{100} \cdot S_N \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \text{ [kVar; kVA]} \quad (17)$$

Kde:

i_0 - procentní proud naprázdno transformátoru

u_k - procentní napětí nakrátko

Jalové ztráty transformátorů v sítích velkou měrou ovlivňují jalový příkon celé soustavy. Zhoršují účinnost a tím rostou činné ztráty ve vedeních, protože jalové složky proudu způsobují na činném odporu vedení ztráty. Tyto ztráty je možné omezit použitím speciálních transformátorových plechů.

3.3 Změna napěťové hladiny

Změnu z nižší napěťové hladiny na vyšší je možné brát jako modernizaci stávajícího stavu sítě, abychom dosáhli zvýšení přenosové schopnosti, snížení ztrát apod. Hlavním důvodem přechodu je neustále se zvyšující spotřeba elektrické energie. Přejít na vyšší napěťovou hladinu je doprovázen spoustou změn ve stávající síti. Tyto úkony jsou náročné jak z technického, tak i z ekonomického hlediska.

3.4 Základní hlediska návrhu nové sítě

Pouze malá část elektrických sítí se reálně navrhuje na konstantní maximální zatížení. Velká část elektrických vedení je stále více zatěžována a v důsledku toho je obtížné navrhnout hospodárný průřez vodičů. Obtížnost spočívá hlavně v těžko odhadnutelném vývoji zatížení a celkový návrh je značně ovlivněn budoucí konfigurací sítě, rozložením zdrojů a také spotřeby na uvažovaném území.

V budoucnu může být rozvoj zatížení ovlivněn spoustou faktorů, např. hospodářská krize, války, apod. Nelze přesně určit budoucí zatížení. Dobrý a kvalitní návrh sítě musí vyhovět i takto nepředvídatelnému vývoji co nejlépe. Předpoklad dobrého dynamického návrhu je založen na určení vyhovující rezervy zatížení a to tak, aby síť snesla budoucí růst a výkyvy v zatížení. Rezerva nesmí být příliš velká, aby nedošlo k přílišnému naddimenzování sítě a ke zbytečným investicím. Velikost rezervy se obvykle volí s ohledem na délku životnosti sítě, která je cca 30-40 let.

Z výše uvedeného je zřejmé, že nelze stanovit přesná pravidla, která by stanovovala obecný postup pro dynamický návrh sítí, proto se pro každou síť musí zvolit individuální řešení.

3.5 Ztráty v navrhované síti

Ztráty energie v distribuci elektrické energie jsou rozdílem mezi energií dodanou na vstupní straně zařízení a energií na výstupní straně zařízení. Ztráty můžeme rozdělit na technické a obchodní. Technické ztráty jsou nevyužitelné pro společnost. Obchodní ztráty představují finanční ztráty pro provozovatele.

Technické ztráty můžeme dále rozdělit podle místa vzniku a to na:

- ztráty způsobené transformací
- ztráty v elektrických vodičích rozvodu
- ztráty přídatné (kompenzací, nedokonalou izolací atd.)

Další hlediska, podle kterých můžeme rozdělit technické ztráty, jsou:

- ztráty naprázdno (transformátory v chodu naprázdno, svod, koróna)
- ztráty závislé na zatížení

Pro výpočet ztrát transformátorů uvažujeme míru využití jmenovitého výkonu. Pro ztráty v transformátoru platí vztah již výše uvedený v textu.

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \left(\frac{S}{S_N}\right)^2 \cdot \Delta P_{KN} \quad [\text{kW}; \text{kW}; \text{kVA}] \quad (18)$$

Pro ztráty energie transformátoru za rok můžeme psát:

$$W_T = \Delta P_0 \cdot T_0 + \Delta P_{KN} \cdot \left(\frac{S_{SK}}{S_n}\right)^2 \cdot t_z \quad [\text{kWh} \cdot \text{r}^{-1}] \quad (19)$$

Kde:

S_{SK} - výkon skutečně dodávaný transformátorem [MVA]

T_0 - počet hodin provozu za rok [hr^{-1}]

t_z - doba plných ztrát transformátoru [hr^{-1}]

Výše uvedené vztahy nerespektují změnu velikosti napětí, která je uvažována za konstantní a je rovná jmenovité hodnotě. Ztráty v elektrickém vedení klesají se zvětšujícím se průřezem a to má za následek zvýšení cen vodičů.

Roční provozní náklady jsou tvořeny:

- náklady na ztráty elektrické energie
- náklady na odpisy z vynaložených investic

Ekonomicky vyvážený vztah mezi těmito dvěma vztahy je základní problematikou úvah při řešení jednotlivých alternativ. Ztráty energie za rok ve trojfázových vedeních se stejným zatížením fází jsou při rozdílném uspořádání podél vedení dány vztahem:

$$W_{vod} = k_e \cdot \rho \cdot l \cdot J_{ek}^2 \cdot A \cdot t_z \cdot 10^3 \text{ [kWh}\cdot\text{r}^{-1}] \quad (20)$$

Kde:

ρ – rezistivita vodiče [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]

l – délka vodiče [m]

J_{ek} – hospodárná hustota proudu [$\text{A} \cdot \text{mm}^{-2}$]

Výpočet poskytuje požadované výsledky, které byly stanoveny projektem. Výsledné ztráty jsou vyjádřeny součtem ztrát v jednotlivých odběrech, tvoří je součet ztrát trafostanic a ztrát ve vodičích vedení. Pokud bude počet transformací nejmenší možný a budou-li transformátory a vodiče dimenzovány hospodárně, poté budou ztráty v ekonomicky únosných mezích.

Obvyklé prostředky pro snižování ztrát jsou:

- přechod na vyšší napěťovou hladinu
- kompenzace jalového výkonu.
- výměna vodičů
- vhodné zapojení v soustavě s ohledem na ztráty výkonů
- snížení nesouměrnosti zatížení v distribučních soustavách
- pečlivá údržba

3.6 Vztah úbytku napětí ke ztrátám v navrhované síti

Procentní úbytek napětí při účinníku $\cos \varphi = 1$ vedení zatíženého na konci je roven:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I}{U} \cdot 100 \text{ [%; } A; \Omega; V] \quad (21)$$

Procentní ztráty stejného souměrně zatíženého vedení:

$$\Delta P = \frac{3 \cdot R \cdot I^2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot R}{U} \cdot 100 [\%] \quad (22)$$

Tzn. číselnou rovnost:

$$\Delta P = \Delta U$$

Pro vedení rovnoměrně zatížené po celé délce platí:

$$\Delta U = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I}{U} \cdot 100 [\%] \quad \Delta P = \frac{R \cdot I^2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot R}{U} \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

nebo-li číselná procentní hodnota ztrát je menší než číselná procentní hodnota úbytku napětí.

$$\frac{\Delta P}{\Delta U} = \frac{2}{3} \text{ nebo-li: } \Delta P = \frac{2}{3} \cdot \Delta U [\%] \text{ platí pro rovnoměrně zatížené vedení.}$$

Pokud $\cos \varphi$ není roven 1, potom u vedení zatíženého na konci a při současném $X \approx 0$ je výsledný vztah pro procentní úbytek napětí:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot R \cdot I \cdot \cos \varphi}{U} \cdot 100 [\%]$$

Pro ztráty platí:

$$\Delta P = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot R}{U \cdot \cos \varphi} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

Po úpravě dostaneme:

$$\Delta P = \frac{\Delta U}{\cos^2 \varphi} [\%] \quad (25)$$

Z uvedeného je patrné, že sítě s velkým úbytkem napětí mají také velké ztráty. Velikost úbytku napětí může být přibližným ukazatelem velikosti ztrát v procentech.

3.7 Charakteristické změny v síti při přechodu na vyšší napěťovou hladinu

Při tomto druhu modernizace stávající sítě dochází v této síti k mnohým změnám. Veškerá zařízení stávající sítě, která svými parametry neumožňují chod na nově zvolené napěťové hladině, musí být vyměněna. Před zahájením výměny je nutné u některých zařízení analyzovat jejich stav vzhledem k jejich stáří.

Toto se týká především výměny kabeláže, jelikož některé druhy kabelů, které byly instalovány v nedávné době, mohou vyhovovat požadavkům nové sítě, a tak by jejich výměna představovala zbytečnou investici.

Dále může docházet ke změně rozložení napájecích zdrojů, vzhledem k jednotlivým oblastem, popřípadě k úplné změně topologie sítě. Je patrné, že každá síť si žádá individuální přístup, a individuálně se musí přistupovat k návrhu nové sítě.

Typické změny při přechodu na vyšší napěťovou hladinu:

- rekonstrukce stávajících rozvodů
- výstavba nových rozvodů
- rekonstrukce stávajících DTS
- výměna nevyhovující kabeláže

Návrh a realizace výše uvedených změn musí vyhovět požadavkům na silnoproudý rozvod. Jednotlivé požadavky jsou popsány v příslušných normách.

K základním požadavkům patří:

- **Bezpečnost osob i věcí** – tento požadavek má zajistit, aby elektrický rozvod, krytí nebo ochranné prvky byly provedeny tak, aby nedošlo k úrazu elektrickým proudem, nebo k jiným nepříznivým účinkům elektrické energie (vznik požáru)
- **Provozní spolehlivost** – elektrický rozvod musí být proveden tak, aby elektrická energie byla v požadovaném množství k dispozici okamžitě, dle potřeby.
- **Přehlednost provozu** - důležitý požadavek především v rozvodnách, kde je soustředěno větší množství elektrických přístrojů a předmětů.
- **Možnost rychlého odstranění poruchy** - v elektrickém rozvodu je porucha nežádoucím jevem. Správně fungující elektrické ochrany výrazně snižují následky poruch.
- **Hospodárnost provozu** – elektrická zařízení by měla být provozována tak, aby pracovala s co největší účinností a malými ztrátami. Důležité je, aby rozvod elektrické energie byl správně navržen, aby takto byly využity i průřezy vodičů a jmenovité výkony elektrických přístrojů.

- **Hospodárné využití typizovaných opakovaných celků** – u silnoproudých rozvodů existují jednotlivá zařízení a elektrické přístroje v typizovaných velikostech, např. rozvaděče, transformovny, odpojovače, vypínače a další zařízení rozveden při různých napětových hladinách. Výběr zařízení musí být takový, aby bylo zajištěno jejich ekonomické využití a nebyly tvořeny zbytečně velké rezervy ve výkonech, použitých materiálech a celých zařízeních. [7]

4 Kontrola odolnosti vůči zkratovým proudům

Vedení musí odolávat jak dynamickým, tak i tepelným účinkům zkratových proudů. Dynamické síly vznikají elektromagnetickým působením proudů v sousedních vodičích. Největší silový ráz způsobuje tzv. zkratový proud i_p . Je to vlastně první amplituda zkratového proudu po vzniku zkratu za předpokladu maximální stejnosměrné složky.

Síla mezi vodiči vztažená na jeden metr vodiče je dána vztahem:

$$F_k = k_1 \cdot k_2 \cdot 2 \cdot \frac{i_p^2}{a} \cdot 10^{-7} [N \cdot m^{-1}] \quad (26)$$

Kde:

k_1 - koeficient tvaru vodiče (respektuje rozložení proudů)

k_2 - koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posuv proudů

i_p – nárazový zkratový proud [A]

A – vzdálenost vodičů [m]

Tepelné účinky zkratového proudu působí nepříznivě na izolaci vodičů. Zkratový proud má za následek velké oteplení během krátké doby trvání zkratu, takto vzniklé teplo není odvedeno do okolí, ale roste teplota vodičů.

Tepelné účinky zkratového proudu se posuzují podle tzv. ekvivalentního oteplovacího proudu I_{TH} (fiktivní hodnota střídavého proudu ustálené velikosti, která za stejný čas působení zkratu má stejné tepelné účinky jako reálný zkratový proud).

Pro minimální průřez kabelu platí s ohledem na tepelné účinky zkratového proudu vztah:

$$S_{MIN} = \frac{I_{TH} \cdot \sqrt{t_K}}{K} [mm^2] \quad (27)$$

Kde:

I_{TH} – ekvivalentní oteplovací proud [A]

t_K - doba trvání zkratu [s]

K – koeficient, který respektuje teplotu jádra kabelu před a po zkratu [3]

4.1 Metodika výpočtů zkratů dle ČSN EN 60909-0

Kompletní výpočet zkratových proudů vyznačuje proudy jako funkce času v místě zkratu od začátku do konce. V naprosté většině praktických případů takový výpočet není nutný. Stačí nám znalost efektivní hodnoty souměrné složky a nárazový zkratový proud i_p zkratového proudu po vzniku zkratu. Největší hodnota i_p je závislá na časové konstantě zanikající aperiodické složky a kmitočtu, tedy na poměru R/X nebo X/R zkratové impedance Z_k , můžeme předpokládat, že je jí dosahováno, vznikne – li zkrat v okamžiku průchodu napětí nulou.

4.2 Předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Předpokládáme, že po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu. Trojfázový je pořád trojfázový.
- Během zkratu nedochází k žádným změnám v síti.
- Zkraty, které postihují více než jednu fázi, vznikají v témže místě.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže se zanedbávají vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.
- Při výpočtu uvažujeme vliv synchronních strojů a asynchronních motorů. Vliv polovodičových zařízení respektujeme, jen pokud mohou v době trvání zkratu dodávat zkratový proud.
- Při zkratu na nízkém napětí se neuvažují příspěvky paralelních kondenzátorů a kapacit ani k nárazovému zkratovému proudu.

4.3 Metoda výpočtů – Ekvivalentní zdroj v místě zkratu

Tato metoda je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Takto zavedený zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí. Všechna ostatní napětí v soustavě jsou nulová. Nadřazenou soustavu určuje jen její vlastní vnitřní impedance přepočtená na stranu nižšího napětí transformátoru a transformátorem pomocné vlastní impedance vtažené na stranu nižšího napětí.

4.4 Použití souměrných složek

Výpočet velikostí proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, např. v případě transponovaných vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají požadovanou přesnost také v případě netransponovaných venkovních vedení.

Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- proud sousledné složkové soustavy
- proud zpětné složkové soustavy
- proud netočivé složkové soustavy

Uvažujeme fázi L_1 za referenční, potom jsou proudy:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L2} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(2)} \\ \underline{I}_{L3} &= \underline{I}_{(0)} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{(2)} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Souslednou zkratovou impedanci \underline{Z}_1 určíme, když souměrnou soustavu napětí sousledné složky v odpovídajícím pořadí fází přiložíme do místa zkratu, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny vlastní vnitřní impedancí.

Zpětnou zkratovou impedanci \underline{Z}_2 určíme, když souměrnou soustavu napětí zpětné složky přiložíme do místa zkratu.

Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou lišit jen u točivých strojů. Při výpočtu elektricky vzdálených zkratů můžeme uvažovat $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$.

Netočivou zkratovou impedanci \underline{Z}_0 v místě zkratu určíme, když přiložíme střídavé napětí mezi třemi zkratovanými fázemi a společným zpětným vedením (např. zemnicí soustavou, nulovým vodičem, zemnicími vodiči, stíněním kabelu).

Při výpočtu nesouměrných zkratových proudů v soustavách vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí s použitím ekvivalentního napětového zdroje se v místě zkratu musí uvažovat kapacita netočivé složky vedení pro soustavy s izolovaným uzlem, rezonančně uzemněné a soustavy s uzemněným uzlem se zemnicím faktorem vyšším než 1,4.

Zanedbání netočivé složky kapacit vedení v soustavách s uzemněným uzlem vede k vypočítaným zkratovým proudům o něco vyšším než ve skutečnosti. Tento rozdíl je závislý na konfiguraci sítě.

Jen ve zvláštních případech je netočivá složka impedance v místě zkratu stejná jakou sousledná a zpětná impedance.

4.5 Určení maximálního zkratového proudu

Pro výpočet maximální možné hodnoty zkratového proudu vycházíme z nejpříznivějšího stavu soustavy:

- a) Musíme použít napětový součinitel c_{\max} podle tabulky 2
- b) Vybrat nastavení soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- c) Motory musí být zahrnuty do výpočtu podle potřeby.
- d) Uvažují se odpory R_l vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C

4.6 Určení minimálního zkratového proudu

Pokud určujeme minimální velikost zkratového proudu, vycházíme z omezeného stavu elektrizační soustavy.

- a) Musíme použít napětový součinitel c_{\min} podle tabulky 2
- b) Zvolit nastavení soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu.
- c) Vliv motorů můžeme zanedbat

- d) Při napájení stanice dvěma transformátory nebo dvěma vedeními určujeme minimální proudy při odpojení jednoho transformátoru nebo vedení.
- e) Odpor R_l vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě.

$$R_l = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (29)$$

Kde:

R_{L20} - je odpor při 20°C

θ_e - teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu

α - součinitel rovný $0,004/\text{K}$, platný pro praktické účely pro měď hliník a slitinu hliníku.

Jmenovité napětí U_N	Napěťový součinitel c pro výpočet	
	c_{\max}	c_{\min}
Nízké napětí 100V až 1000V	1,05* 1,10**	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí > 35 kV		

* pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6%

** pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10%

Tabulka č. 2 Napěťový součinitel pro výpočet zkratových proudů

4.7 Výpočet parametrů soustavy

Síťový napáječ

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \quad (\Omega, -, \text{kV}, \text{kA}) \quad (30)$$

I''_{kQ} - počáteční rázový souměrný proud

U_{nQ} - jmenovité napětí soustavy v bodě připojení napáječe

c - napěťový součinitel (podle tabulky 2)

Dvouvinut'ové transformátory

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} (\Omega, V, -V, VA) \quad (31)$$

u_{kr} – jmenovité napětí nakrátko transformátoru

U_{rT} – jmenovité napětí transformátoru

S_{rT} – jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru

Venkovní vedení a kabely

Impedance sousledné a zpětné složkové soustavy u venkovních vedení a kabelů jsou stejné. Impedanci venkovních vedení a kabelů lze vypočítat z parametrů vodiče, jako jsou průřezy a rozteče vodičů

$$Z_L = R_L + jX_L (\Omega) \quad (32)$$

Činný odpor vedení:

$$R_L = \rho \cdot \frac{l}{S_n} \quad (33)$$

Reaktance pro venkovní vedení:

$$X_L = 2\pi f l \cdot 0,46 \cdot \log \frac{d}{r} + 0,05 \quad (34)$$

Kde:

ρ – rezistivita použitého materiálu vodiče

S_n - jmenovitý průřez v mm^2

l – délka vedení v metrech

d – geometrická střední vzdálenost mezi vodiči

r - poloměr vodiče

V případě kabelů je sousledná impedance uvedena výrobcem.

Reaktory

$$Z_R = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{rR}} (\Omega, \%, V, A) \quad (35)$$

Kde:

u_{kr} - jmenovité napětí nakrátko reaktoru

I_{rR} - jmenovitý proud reaktoru

U_n – jmenovité napětí soustavy v místě připojení reaktoru

Synchronní motory

$$X_d'' = \frac{x_d''}{100} \cdot \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} \quad (\Omega, \%, V, VA) \quad (36)$$

Můžeme použít tyto hodnoty pro dostatečnou přesnost:

$R_{Gf} = 0,05X_d''$ - pro generátory s $U_{rG} > 1kV$ a $S_{rG} \geq 100MVA$

$R_{Gf} = 0,07X_d''$ - pro generátory s $U_{rG} > 1kV$ a $S_{rG} \leq 100MVA$

$R_{Gf} = 0,15X_d''$ - pro generátory s $U_{rG} < 1kV$

Obvykle $X_{(1)} = X_{(2)}$, pokud jsou hodnoty X_d'' a X_q'' odlišné, lze použít $X_{(2)G} = (X_d'' + X_q'')/2$.

Netočivou impedanci stroje udává výrobce.

Asynchronní motory

$$X_M = \frac{U_{rM}^2}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}} \cdot S_{rM}} \quad (\Omega, kV, -, MVA) \quad (37)$$

Kde:

U_{rM}^2 - jmenovité napětí motoru

$\frac{I_{LR}}{I_{rM}}$ – poměr záběrného proudu motoru

S_{rM} - jmenovitý zdánlivý příkon motoru

4.8 Výpočet zkratových poměrů

V případě vzdáleného zkratu se zkratový proud počítá jako součet těchto složek:

- střídavé složky s konstantní amplitudou po celou dobu zkratu
- stejnosměrné složky začínající na počáteční hodnotě A a klesající k nule.

Souměrné střídavé proudy I_k'' , I_b , a I_k jsou efektivní hodnoty a jsou si velikostně téměř rovny.

Pokud se jedná o případ blízkého zkratu, je zkratový proud uvažován jako součet těchto složek:

- střídavé složky se zmenšující se amplitudou během zkratu,
- stejnosměrné složky začínající v A a jdoucí směrem k nule.

Při výpočtech zkratových proudů je potřeba určit nejen počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' , a nárazový zkratový proud I_p , ale i samozřejmě vypínací zkratový proud I_b a ustálený I_k . U tohoto případu je souměrný zkratový vypínací proud I_b , menší než počáteční souměrný zkratový proud I_k'' . V některých neobvyklých případech se může stát, že okamžitá hodnota klesajícího proudu dosáhne nuly až za několik period po tom, kdy došlo ke zkratu. S tímto jevem norma nepočítá.

Pro výpočet počátečních proudů I_k'' , I_b , a I_k v místě zkratu je možné síť převést na obdobnou zkratovou impedanci \underline{Z}_K v místě zkratu. Tento postup nemůžeme aplikovat na výpočet nárazového zkratového proudu i_p , musíme rozlišovat mezi soustavami s paralelními větvemi a bez nich.

4.9 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' ,

V běžných případech můžeme zvažovat, kdy je $\underline{Z}_{(0)} > \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, se vyskytne největší hodnota proudu v trojfázovém zkratu. Pokud nastane případ $\underline{Z}_{(0)} < \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, největší hodnota souměrného rázového proudu se vyskytne u dvoufázového zemního zkratu.

Trojfázový zkrat

Obecně počítáme podle níže uvedené rovnice z napětí ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu a zavádí se ekvivalentní zdroj napětí se součinitelem c (viz tabulka 2).

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |\underline{Z}_K|} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_K^2 + X_K^2}} (A, -, V, \Omega) \quad (38)$$

Dvoufázový zkrat

V prvotní fázi zkratu je zpětná impedance téměř rovna sousledné impedanci, přičemž můžeme zanedbat, zda se jedná o zkrat blízký nebo vzdálený. $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{c \cdot U_n}{2 \cdot |\underline{Z}_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_k'' \quad (39)$$

Jednofázový zkrat

Vypočítáme dle následující rovnice:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}} \quad (40)$$

Pro vzdálený zkrat platí $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|2 \cdot \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (41)$$

Pokud je $\underline{Z}_{(0)} < \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, je počáteční rázový proud při jednofázovém zkratu $I_{k1}'' > I_k''$, ale menší než I_{kE2E}

4.10 Nárazový zkratový proud i_p

Velikost nárazového zkratového proudu je závislá na impedanci zkratového obvodu a na okamžiku vzniku zkratu. Největší hodnota zkratového proudu je při elektricky blízkém zkratu, naopak při zkratech vzdálených vzniká malé přechodné zvětšení proudu nad hodnotu proudu v ustáleném stavu.

Pro třífázový zkrat napájený z nezaizolovaných sítí můžeme příspěvek nárazového zkratového proudu vyjádřit:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (42)$$

κ – nárazový činitel, který se určí takto:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \frac{R}{X}} \quad (43)$$

Obě výše uvedené rovnice předpokládají vznik zkratu při průchodu napětí nulou.

Dvoufázový zkrat

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}'' \quad (44)$$

Součinitel κ můžeme spočítat v závislosti na konfiguraci sítě, nebo pro zjednodušení je dovoleno použít stejnou hodnotu κ jako pro třífázový zkrat.

Když $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ je nárazový zkratový proud i_{p2} při dvoufázovém zkratu menší než proud i_p , platí následující vztah

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p \quad (45)$$

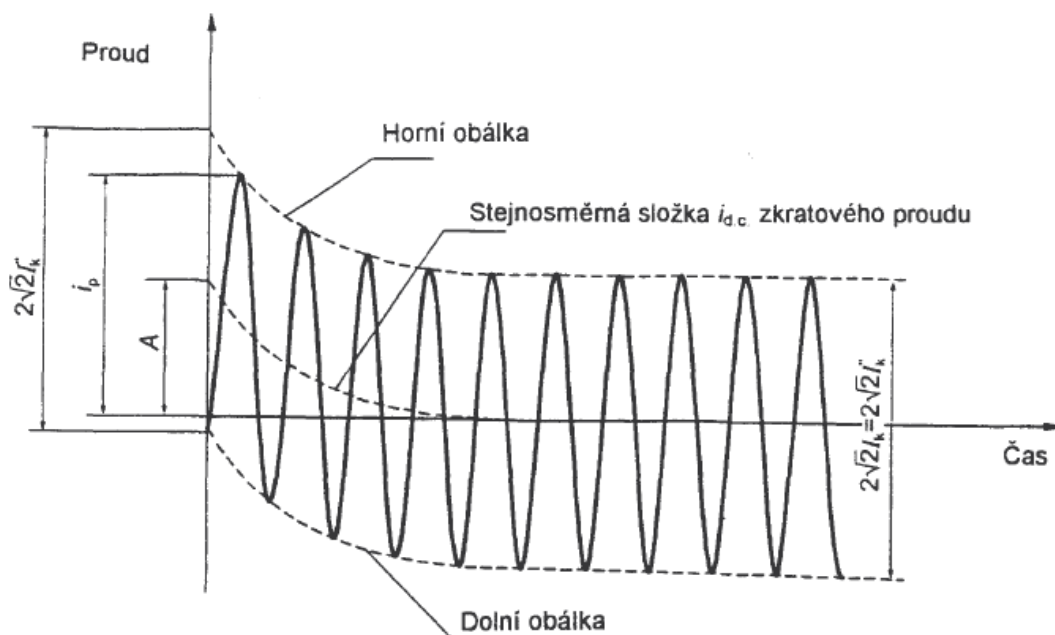
Jednofázový zkrat

$$i_{p1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' \quad (46)$$

Opět je možné použít stejných hodnot κ jako pro třífázový zkrat.

4.11 Stejnosemnná složka zkratového proudu $i_{d.c}$

Maximální stejnosměnná složka $i_{d.c}$ zkratového proudu je znázorněna na obrázku 7. Vzniká při zkratu, pokud při vzniku zkratu průchodu napětí nulou. Tlumení stejnosměnné složky závisí na R/X zkratového obvodu.



Obr. č. 7 Průběh stejnosměnné složky zkratového proudu

Vypočítáme podle vztahu:

$$i_{d.c} = \sqrt{2} \cdot I_{k1}'' \cdot e^{-2\pi f t \frac{R}{X}} \quad (47)$$

Kde:

I_k'' - počáteční souměrný rázový proud

f – jmenovitý kmitočet

t - čas, pro který se má určit velikost stejnosměrné složky [4]

5 Letiště Ostrava a.s.

5.1. Představení letiště

Letiště Ostrava a.s. se nachází v obci Mošnov, cca. 20 km od ostravského hlavního nádraží v nadmořské výšce 257 m. Disponuje jednou vzletovou a přistávací dráhou o délce 3,5 km a šířce 64 m. Letiště průměrně na svém terminálu pro cestující odbaví ročně okolo 300 000 cestujících.

5.2 Současný stav LDS

Energetická bilance:

Stávající instalovaný výkon	$P_i = 3750.0 \text{ kW}$
Soudobost	$\beta = 0,8$
Soudobý příkon	$P_p = 3000.0 \text{ kW}$

Na letišti jsou tyto napěťové soustavy:

IT 3x 22 kV, AC 50 Hz „silové zařízení“ rozvodny 22 kV

IT 3x 6 kV, AC 50 Hz „silové zařízení“ rozvodny 6 kV

IT 2x 110 V, DC napájení ochran, ovládání, napájení střádačů

TN-C 3x 400/230 V, AC 50 Hz distribuční síť nn (vč. záložních zdrojů) [8]

Letiště je napojeno na distribuční soustavu ČEZ 22 kV dvěma přívodními linkami

VN 214 – kabelem 3x22- AXEKVCEY 1x240 mm² a VN 217 – kabelem AXEKVCEY 1x240 mm² . Tyto linky ústí do rozvodny RVN- 22kV. Rozvodna obsahuje vývody na transformátory TR1 a TR2, dále spínač a měření spotřeby elektrické energie. Rozvodna je skříňového provedení o sedmi skříních, v zapojení s podélnou spojkou. Na přívodních skříních

je proveden automatický záskok pomocí dvou relé VD3-H a jednoho programovatelného Zelo Logic. Záskok musí zajistit zapnutí záložního zdroje přívodu do 6 s od výpadku napájení.

Transformátory TR1 a TR2

Suché transformátory 22kV / 6kV o výkonu 5000kVA typu TRIHAL. Základní parametry transformátoru:

Jmenovitý výkon	5000 kVA
Primární izolační napětí	24 kV
Primární provozní napětí	22 kV
Převod	22 / 6 kV
Sekundární provozní napětí	6 kV
Frekvence	50 Hz
Hodinový úhel	Dy1
Napětí nakrátko	7 %
Krytí	IP00
Materiál vinutí	Al / Al
Ztráty naprázdno	10000 W
Ztráty nakrátko (75°C)	19300 W

Rozvodna RVN- 6 kV

Rozvodna skříňového provedení obsahuje čtrnáct skříní v zapojení s podélnou spojkou, se dvěma přívodními poli. Přívod je veden z transformátorů 22/6 kV, 5000 VA kabely z TR1 3x6 – ANKTOYPV 1x185 mm² a z TR2 3x6 – ANKTOYPV 1x185 mm². Kompenzace účinníku je realizována na napětíové hladině 6 kV a kompenzační rozvaděče jsou napojeny z této rozvodny. Dále jsou z této rozvodny realizovány vývody pro trafostanice TS3, TS23, TS26, TS2, TS22 a vývody pro transformátory TR4 a TR5 6/0,4 kV, 250 kVA

Transformátory TR5 a TR6

Suché transformátory 6kV / 0,4kV o výkonu 250kVA typu TRIHAL. Základní parametry transformátoru:

Jmenovitý výkon	250 kVA
Izolační napětí	7,2 kV
Provozní napětí	6 kV

Převod	6 / 0,4 kV
Frekvence	50 Hz
Hodinový úhel	Dyn1
Napětí nakrátko	7 %
Krytí	IP31
Materiál vinutí	Al / Al
Ztráty naprázdno	880 W
Ztráty nakrátko (75°C)	3300 W

Rozvaděč RNN – 0,4 kV

Rozvaděč je skříňového provedení, skládá se z pěti polí stojících v bloku s napájecími transformátory. Rozvaděč je připojen na transformátory TR4 a TR5 kabelem 3x6-ANKTOYPV 1x25 mm², stejný kabel je použit pro oba přívody.

Kompenzace účíníku

Je realizována na napěťové hladině 6kV. Pro tento účel slouží dva téměř identické kompenzační rozvaděče RC1 a RC2, které se skládají ze tří polí s kompenzačním výkonem 2100 kVAr . Rozvaděče jsou napájeny z rozvaděče RVN- 6 kV kabelem 3x6- ANKTOYPV 1x95 mm² . [5]

5.3 Parametry sítě Letiště Ostrava a.s

Napětí:

$$U_n = 22 \text{ kV}$$

Počáteční zkratový výkon:

$$S_{ks} = 133,4 \text{ MVA}$$

Počáteční zkratový proud:

$$I_k'' = \frac{S_{ks}}{\sqrt{3} \cdot U_{nq}} = \frac{133,4 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3} = 3,5 \text{ kA}$$

Jmenovitý převod transformátoru:

$$t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} = \frac{22}{6} = 3,66$$

Impedance sítě (odpor zanedbáme):

$$Z_t = \frac{c \cdot U_{nq}}{\sqrt{3} \cdot I_{kq}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{1,1 \cdot 22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3,5 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{3,66^2} = 0,298 \Omega$$

$$Z_t = 0 + j0,298 \Omega$$

Transformátory TR1 a TR2

$$22/6 \text{ kV } S_{RT} = 5000 \text{ kVA } u_{kr} 7 \% P_{KRT} = 19300 \text{ W}$$

Jmenovitý proud na straně nižšího napětí:

$$I_{RT} = \frac{S_{RT}}{\sqrt{3} \cdot U_{RT}} = \frac{5000 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 481,12 \text{ A}$$

Impedance transformátoru bez korekčního činitele:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100} \cdot \frac{U_{RT}^2}{S_{RT}} = \frac{7}{100} \cdot \frac{6 \cdot 10^3^2}{5000 \cdot 10^3} = 0,504 \Omega$$

$$R_T = \frac{P_{KRT}}{3 \cdot I_{RT}^2} = \frac{19300}{3 \cdot 481,12^2} = 0,0278 \Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{0,504^2 - 0,0278^2} = 0,503 \Omega$$

Poměrná reaktance transformátoru:

$$\chi = \frac{X_{T1}}{\frac{U_{RT}^2}{S_{RT}}} = \frac{0,503}{\frac{6 \cdot 10^3^2}{5000 \cdot 10^3}} = 0,0698 \Omega$$

Korekční činitel:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6 \cdot \chi} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0698} = 1,003$$

Korigovaná impedance transformátoru:

$$Z_{TK} = K_T \cdot (R_T + jX_T)$$

$$Z_{TK} = 1,003 \cdot 0,504 = 0,506$$

$$R_T = K_T \cdot R_T = 1,003 \cdot 0,0278 = 0,0278\Omega$$

$$X_T = K_T \cdot X_T = 1,003 \cdot 0,503 = 0,5045\Omega$$

$$Z_{TK} = 0,0278 + j0,5045\Omega$$

Parametry kabelů

Anktoypv	R	X
[mm]	[Ω]	[Ω]
3x16	2,24	0,119
3x25	1,43	0,103
3x50	0,725	0,098
3x95	0,396	0,13
3x120	0,299	0,097
3x185	0,194	0,091
3x240	0,129	0,088

Tabulka č. 3 Parametry kabelů

Kabel č. 1

ANKTOYPV 3x95

$$l = 2,29\text{km}$$

$$Z_{k1} = 2,29 \cdot (0,396 + j0,130) = 0,907 + j0,2977\Omega$$

Kabel č. 2

ANKTOYPV 3x25

$$l = 0,94\text{km}$$

$$Z_{k2} = 0,94 \cdot (1,43 + j0,103) = 1,344 + j0,09682\Omega$$

Kabel č. 3

ANKTOYPV 3x25

$$l = 0,4\text{km}$$

$$Z_{k3} = 0,572 + j0,0412\Omega$$

Kabel č. 4

ANKTOYPV 3x185

l = 1,5km

$$Z_{k4} = 1,5 \cdot (0,194 + j0,091) = 0,291 + j0,1365\Omega$$

Kabel č. 5

ANKTOYPV 3x95

l = 2,9km

$$Z_{k5} = 1,1484 + j0,377\Omega$$

Kabel č. 6

ANKTOYPV 3x25

l = 0,4km

$$Z_{k6} = 0,572 + j0,0412\Omega$$

Kabel č. 7

ANKTOYPV 3x16

l = 1,2km

$$Z_{k7} = 1,2 \cdot (2,224 + j0,113) = 2,668 + j0,1356\Omega$$

Kabel č. 8

ANKTOYPV 3x50

l = 0,3km

$$Z_{k8} = 0,3 \cdot (0,725 + j0,098) = 0,2175 + j0,294\Omega$$

Kabel č. 9

ANKTOYPV 3x25

2,2km

$$Z_{k9} = 2,2 \cdot (1,43 + j0,103) = 3,146 + j0,226\Omega$$

Kabel č. 10

ANKTOYPV 3x95

4,2km

$$Z_{k10} = 4,2 \cdot (0,396 + j0,130) = 1,663 + j0,546\Omega$$

Kabel č. 11

ANKTOYPV 3x50

0,9km

$$Z_{k11} = 0,9 \cdot (0,725 + j0,098) = 0,6525 + j0,0882\Omega$$

Kabel č. 12

ANKTOYPV 3x25

1,2km

$$Z_{k12} = 1,2 \cdot (1,43 + j0,103) = 1,716 + j0,1236\Omega$$

Kabel č. 13

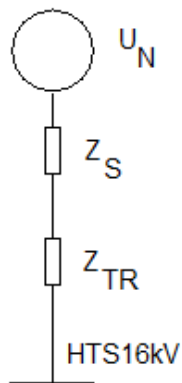
ANKTOYPV 3x120

0,9km

$$Z_{k13} = 0,9 \cdot (0,299 + j0,088) = 0,2691 + j0,0792\Omega$$

5.4 Výpočet zkratových poměrů LDS

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně HTS16kV



Obr. č. 8 Náhradní schéma pro rozvodnu HTS16kV

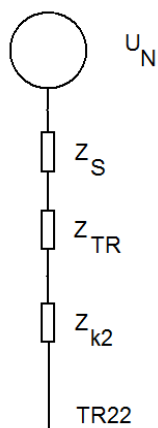
$$Z_S = j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega$$

$$Z_{HTS1} = 0,0278 + j0,8025\Omega \quad |Z_{HTS1}| = \sqrt{R^2 + X^2} = 0,802\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR22}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,802} = 4,75 \text{ kA}$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2,3 = 49,36 \text{ MVA}$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR22



Obr. č. 9 Náhradní schéma pro rozvodnu TR22

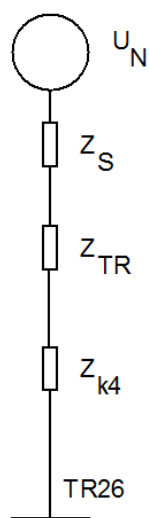
$$Z_s = j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k2} = 1,344 + j0,09682\Omega$$

$$Z_{TR22} = 1,372 + j0,899 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,645\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR22}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,645} = 2,3kA$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2,3 = 23,9MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR26



Obr. č. 10 Náhradní schéma pro rozvodnu TR26

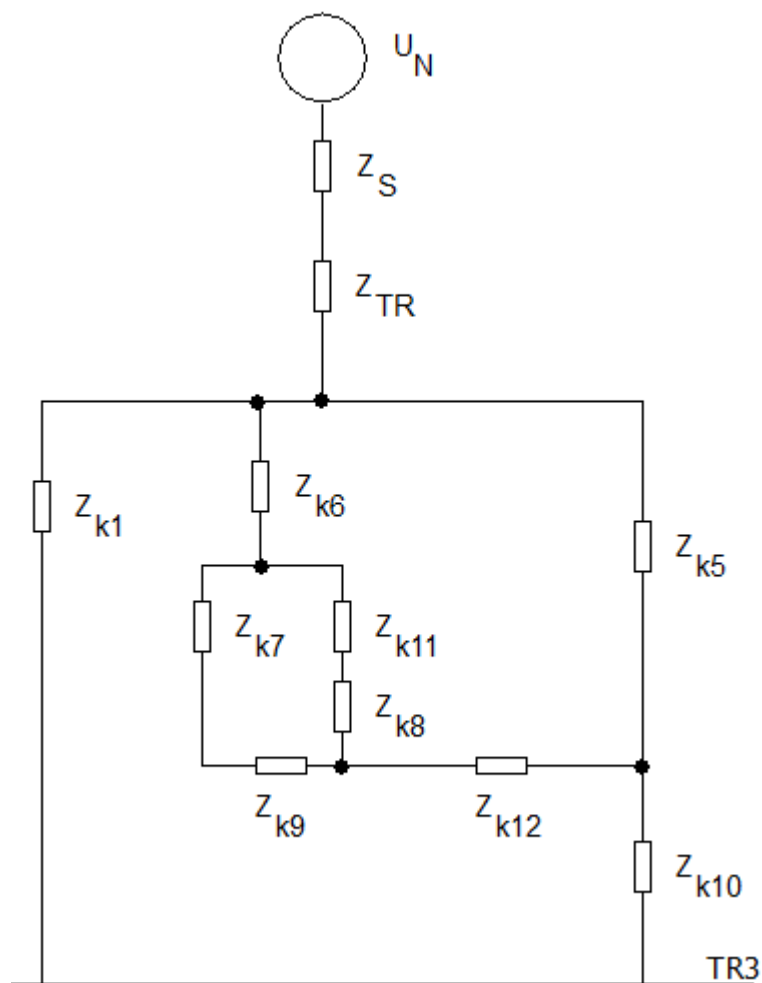
$$Z_s = j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k4} = 0,291 + j0,1365\Omega$$

$$Z_{TR26} = 0,3188 + j0,939 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 0,992\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR26}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,992} = 4,7kA$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 4,7 = 48,84MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR3



Obr. č. 11 Náhradní schéma pro rozvodnu TR3

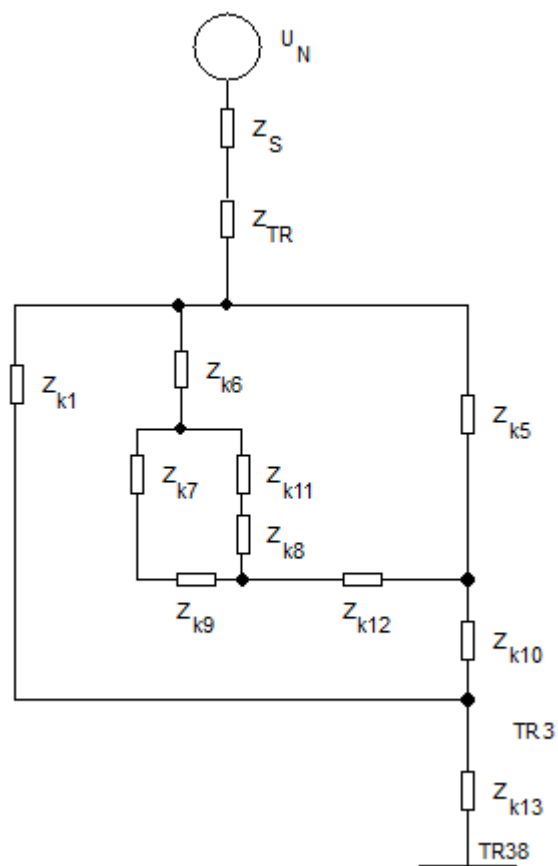
$$\begin{aligned}
 Z_S &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k7} = 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \\
 Z_{k9} &= 3,146 + j0,226\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR3} = 0,7035 + j1,017 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,236\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR3}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,236} = 3,08kA$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 3,08 = 32,04MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR38



Obr. č. 12 Náhradní schéma pro rozvodnu TR3

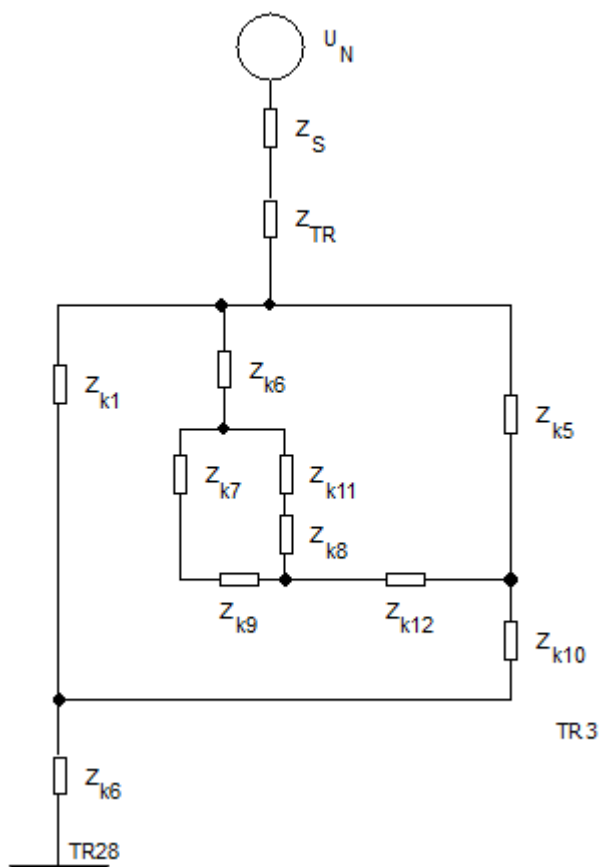
$$\begin{aligned}
 Z_S &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k7} = 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \\
 Z_{k9} &= 3,146 + j0,226\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega \quad Z_{k13} = 0,2691 + j0,0792\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR38} = 0,9726 + j1,096 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,465\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR38}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,465} = 2,6kA$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2,6 = 27MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR28



Obr. č. 13 Náhradní schéma pro rozvodnu TR28

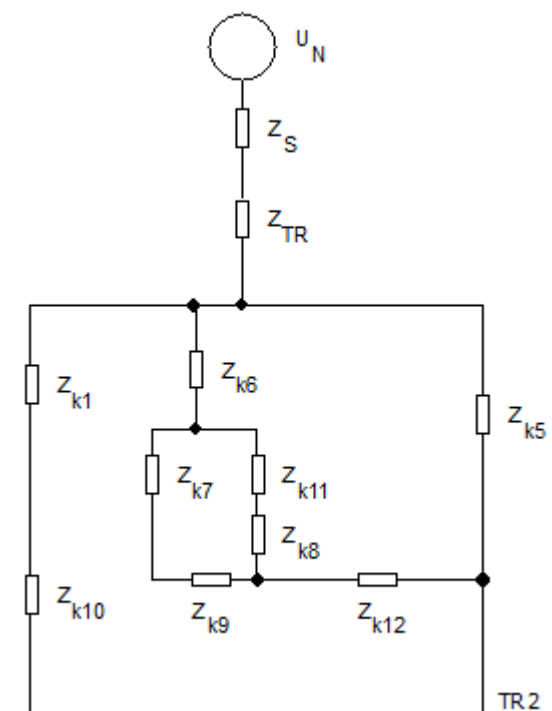
$$\begin{aligned}
 Z_S &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k7} = 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \\
 Z_{k9} &= 3,146 + j0,226\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega \quad Z_{k6} = 0,572 + j0,0412\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR28} = 1,275 + j1,582 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,657\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR28}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,657} = 2,29kA$$

$$S_{kS} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2,6 = 27,02MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR2



Obr. č. 14 Náhradní schéma pro rozvodnu TR2

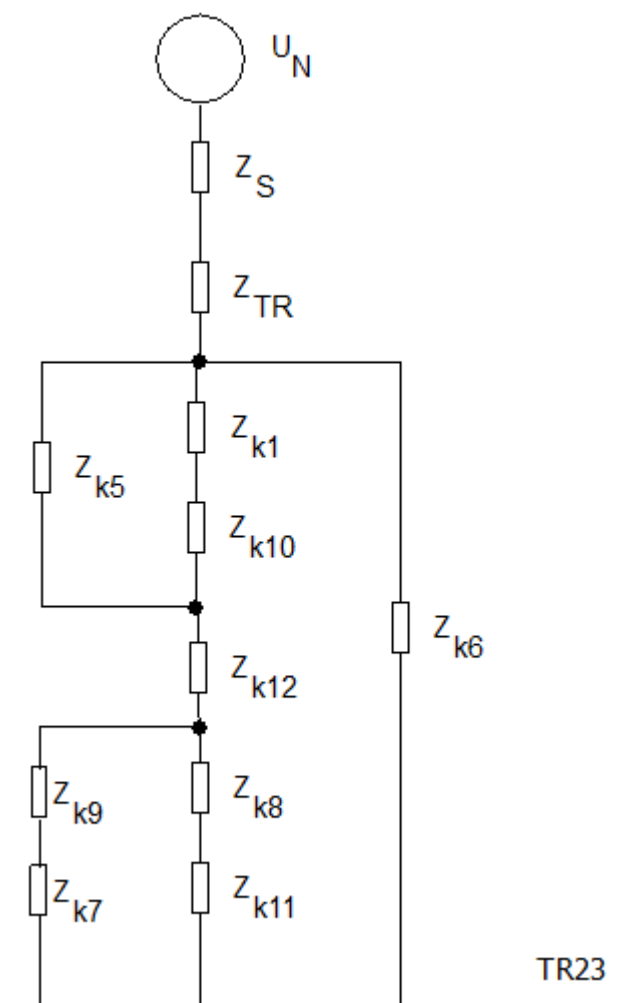
$$\begin{aligned}
 Z_S &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k7} = 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \\
 Z_{k9} &= 3,146 + j0,226\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR2} = 0,741 + j0,9784 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,227\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR2}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,227} = 3,10kA$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 3,10 = 32,21MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR23



Obr. č. 15 Náhradní schéma pro rozvodnu TR23

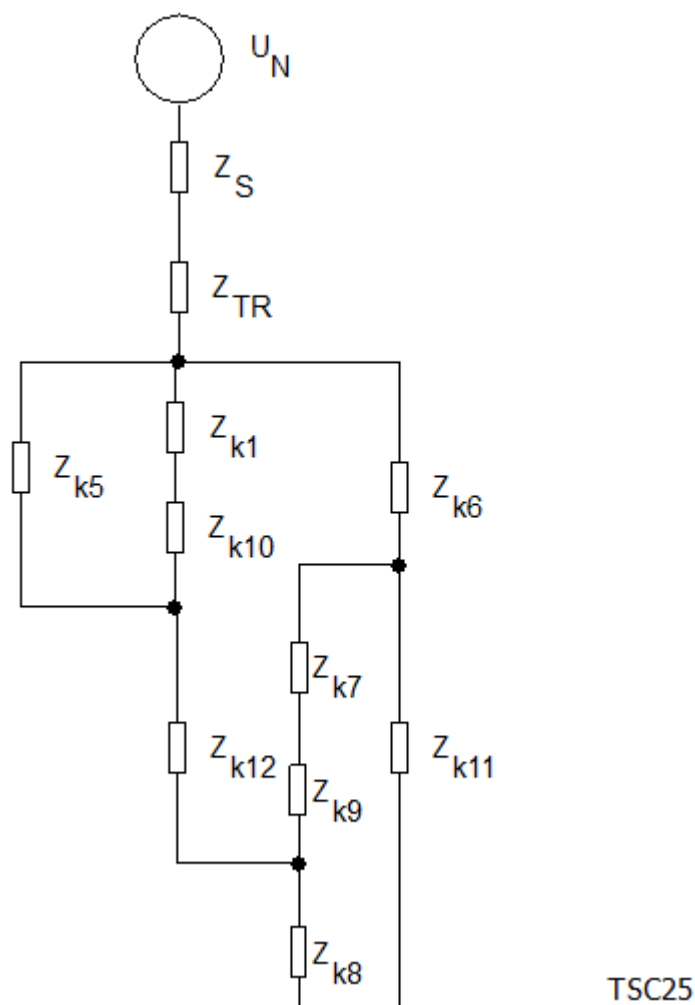
$$\begin{aligned}
 Z_S &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,5446\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k7} &= 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \quad Z_{k9} = 3,146 + j0,226\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR23} = 0,515 + j0,8464 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 0,991\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR23}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,991} = 3,85 \text{ kA}$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 3,85 = 40 \text{ MVA}$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TSC25



Obr. č. 16 Náhradní schéma pro rozvodnu TSC25

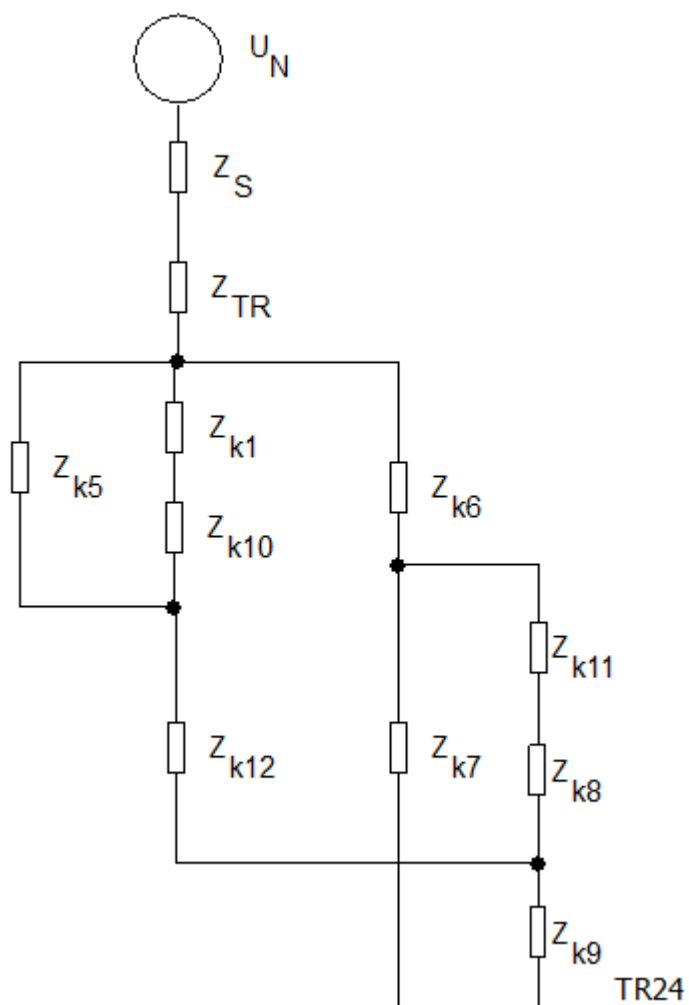
$$\begin{aligned}
 Z_S &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k7} &= 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \quad Z_{k9} = 3,146 + j0,226\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TSC25} = 0,700 + j0,824 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,159\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR23}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,159} = 3,46 \text{ kA}$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 3,46 = 39,95 \text{ MVA}$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR24



Obr. č. 17 Náhradní schéma pro rozvodnu TR24

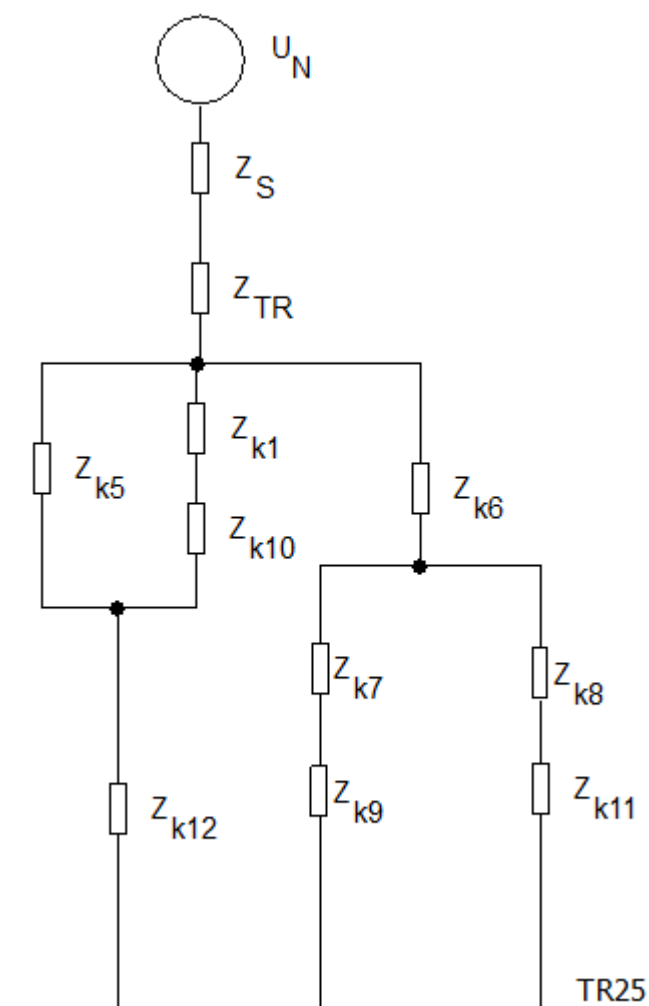
$$\begin{aligned}
 Z_s &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k7} &= 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \quad Z_{k9} = 3,146 + j0,226\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR24} = 2,03 + j0,949 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 2,24\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR23}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 2,24} = 1,7kA$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 3,46 = 17,67MVA$$

Výpočet zkratových poměrů na rozvodně TR5



Obr. č. 18 Náhradní schéma pro rozvodnu TR25

$$\begin{aligned}
 Z_s &= j0,298\Omega \quad Z_{TR} = 0,278 + j0,5045\Omega \quad Z_{k1} = 0,907 + j0,2977\Omega \\
 Z_{k5} &= 1,1484 + j0,377\Omega \quad Z_{k10} = 1,663 + j0,546\Omega \quad Z_{k12} = 1,716 + j0,1236\Omega \\
 Z_{k7} &= 2,668 + j0,1356\Omega \quad Z_{k8} = 0,2175 + j0,294\Omega \quad Z_{k9} = 3,146 + j0,226\Omega \\
 Z_{k6} &= 0,572 + j0,0412\Omega \quad Z_{k11} = 0,6525 + j0,0882\Omega
 \end{aligned}$$

$$Z_{TR25} = 0,904 + j0,987 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = 1,322\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{TR25}} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 1,332} = 2,86 \text{ kA}$$

$$S_{ks} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k = \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 2,86 = 29,73 \text{ MVA}$$

5.5 Porovnání ztrát v kabelech při různých napěťových hladinách

Pro porovnání byl odhadnut spotřebovávaný výkon na několika místech v LDS a následně spočítány činné ztráty na přívodních kabelech. Tyto ztráty byly spočteny pro napětí 6kV a 22kV.

Rozvodna TR3

Rozvodna je připojena kabelem ANTKOYPV 3x95 o délce 2,29 km. U této rozvodny byl odhadnut instalovaný soudobý příkon na 750kW $\cos\varphi = 0,95$. Odpor kabelu je $R = 0,907\Omega$

Proud kabelem při napětí 6kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{750 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 75,96A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 75,96 \cdot 0,95 = 72,16A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 75,96 \cdot 0,312 = 23,7A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 0,907 \cdot (72,16^2 + 23,7^2) = 15,7kW$$

Proud kabelem při napětí 22kV:

$$I = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{750 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 20,7A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 20,7 \cdot 0,95 = 19,86A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 20,7 \cdot 0,312 = 6,46A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 0,907 \cdot (19,68^2 + 6,46^2) = 1,17kW$$

Rozvodna TR22

Zde je připojení realizováno kabelem ANTKOYPV 3x25 o délce 0,94km. Instalovaný soudobý příkon na 350kW $\cos\varphi = 0,95$. Činný odpor kabelu je 1,344Ω.

Proud kabelem při napětí 6kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{350 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 35,45A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 35,45 \cdot 0,95 = 33,67A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 35,45 \cdot 0,312 = 11,1A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 1,344 \cdot (33,67^2 + 11,1^2) = 5,07kW$$

Proud kabelem při napětí 22kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{350 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 9,67A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 9,67 \cdot 0,95 = 9,19A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 9,67 \cdot 0,312 = 3,02A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 1,344 \cdot (9,19^2 + 3,02^2) = 0,378kW$$

Rozvodna TR23

Připojení rozvodny je provedeno 0,4 km dlouhým kabelem typu ANTKOYPV 3x25, který má odpor 0,572Ω. Instalovaný soudobý příkon $P_p=300kW$ $\cos\varphi = 0,95$.

Proud kabelem při napětí 6kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 30,39A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 30,39 \cdot 0,95 = 28,87$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 30,39 \cdot 0,312 = 9,48A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 1,344 \cdot (28,87^2 + 9,48^2) = 3,72kW$$

Proud kabelem při napětí 22kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{300 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 8,28A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 8,28 \cdot 0,95 = 7,87A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 8,28 \cdot 0,312 = 2,59A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 1,344 \cdot (7,87^2 + 2,59^2) = 0,276kW$$

Rozvodna TR26

Tato rozvodna je připojena kabelem ANKTOYPV 3x185 o délce 1,5km. Činný odpor je 0,291Ω. Instalovaný soudobí příkon 900kW cosφ = 0,95.

Proud kabelem při napětí 6kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{900 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 91,16A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 91,16 \cdot 0,95 = 86,6A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 91,16 \cdot 0,312 = 28,44A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 0,291 \cdot (86,6^2 + 28,44^2) = 7,25 kW$$

Proud kabelem při napětí 22kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{900 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 24,86 A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 24,86 \cdot 0,95 = 23,62 A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 24,86 \cdot 0,312 = 7,76 A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 0,291 \cdot (23,62^2 + 7,76^2) = 0,55 kW$$

Rozvodna TR2

Připojení je realizováno kabelem ANKTOYPV 3x95 o délce 2,9km. Instalovaný soudobý příkon je 700kW $\cos\varphi = 0,95$. $R = 1,1484 \Omega$

Proud kabelem při napětí 6kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{700 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 70,9 A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 70,9 \cdot 0,95 = 67,35 A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 70,9 \cdot 0,312 = 22,12 A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 1,1484 \cdot (67,35^2 + 22,12^2) = 17,31 kW$$

Proud kabelem při napětí 22kV:

$$I_N = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{700 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 19,33A$$

$$I_{NC} = I_N \cdot \cos\varphi = 19,33 \cdot 0,95 = 18,36A$$

$$I_{NJ} = I_N \cdot \sin\varphi = 19,33 \cdot 0,312 = 6,03A$$

Činné ztráty kabelu:

$$\Delta P_{3F} = 3 \cdot R \cdot (I_{NC}^2 + I_{NJ}^2) = 3 \cdot 1,1484 \cdot (18,36^2 + 6,03^2) = 1,28kW$$

Celkové činné ztráty kabelů při napětí 6 a 22kV:

$$\Delta P_{3Fcelk6kV} = 49,05kW \quad \Delta P_{3Fcelk22kV} = 3,65kW$$

Jak vyplývá z vypočtených ztrát na základně odhadnutých příkonů jednotlivých rozvodů, pokud budou kabely provozovány na napěťové hladině 22kV, mohou činné ztráty klesnout až na 13,5. násobně než při napětí 6kV. V tomto vypočteném případě je tento pokles 13,44, což odpovídá teoretické hodnotě, rozdíl je způsoben zaokrouhlováním.

Roční spotřeba

Spotřeba spočtena při průměrné době provozu 2000 hodin za rok:

$$W_{6kV} = \Delta P_{3Fcelk6kV} \cdot t = 49,05 \cdot 10^3 \cdot 2000 = 98,1MWh/rok$$

$$W_{22kV} = \Delta P_{3Fcelk22kV} \cdot t = 3,65 \cdot 10^3 \cdot 2000 = 7,3MWh/rok$$

Roční cenové náklady na pokrytí těchto ztrát

Prodejní cena elektřiny

Silová elektřina:	2429 Kč/MWh
Doprava a ostatní služby:	924 Kč/MWh
Celkem:	3353 Kč/MWh

$$C_{6kV} = 98,1 \cdot 3353 = 328928,3 \text{ Kč}$$

$$C_{22kV} = 7,3 \cdot 3353 = 24476,9 \text{ Kč}$$

Rozdíl ročních nákladů je 304451,4 Kč. Tato částka udává pouze rozdíl, pokud by kabely byly provozovány na různých napěťových hladinách. Nereflektuje náklady, které by bylo nutné vynaložit pro provozování celé sítě na vyšší napěťové hladině. Znamenalo by to výměnu transformátorů a vybavení rozvodu pro provoz na vyšší napěťové hladině. Tyto náklady mohou být značně vysoké.

5.6 Návrh úprav LDS

Navrhoval bych pokračovat v rozšiřování sítě a výměně zastaralých zařízení v některých rozvodnách. Doporučuji výměnu nevyhovujících kabelů vzhledem k ztrátám, které na nich vznikají. Po dokončení rozvodny 100/22kV v Mošnově upravit síť, aby ji bylo možno provozovat jako dvoupaprskovou s paralelním provozem dvou transformátorů 5000kVA.

Do roku 2015 se dostat na požadovanou energetickou bilanci závodu, která by měla být:

Instalovaný výkon:

$$P_i = 12000 \text{ kW}$$

Soudobost:

$$\beta = 0,8$$

Soudobý příkon:

$$P_p = 9600 \text{ kW}$$

Výpočet návratnosti investic pokud by celá LDS byla provozována na napěťové hladině 22kV. Tato úprava by vyžadovala výměnu všech transformátorů ve všech rozvodnách včetně

odpojovačů a přípojníc a ochran. Výměnu kabeláže uvažovat nebudeme. Současné transformátory 6/04kV 250kVA nahradíme transformátory 22/04kV 250kVA.

Zvolil jsem suchý transformátor BEZ typ 732.22 s těmito parametry:

Jmenovitý výkon	250 kVA
Izolační napětí	25 kV
Provozní napětí	22 kV
Převod	22 / 0,4 kV
Frekvence	50 Hz
Hodinový úhel	Dyn1
Napětí nakrátko	6 %
Krytí	IP23
Materiál vinutí	Al / Al
Ztráty naprázdno	880 W
Ztráty nakrátko (75°C)	3300 W



Obr. č. 19 Transformátor BEZ 22/04kV [6]

Cena transformátoru včetně ochran odpojovače a přípojníc činí 250 000 Kč, celkem je třeba vyměnit 10 transformátorů.

	Cena
Transformátor	250 000,00 Kč
Celkový náklad na výměnu	2 500 000,00 Kč

Tabulka č. 4 celkové náklady na výměnu transformátorů

$$t = \frac{\text{Celkové náklady}}{\text{náklady na provoz}} = \frac{2\,500\,000}{304\,451,4} = 8,2 \text{ let}$$

Touto jednorázovou investicí snížíme ročně náklady na provoz sítě o 304451,4 Kč, tímto snížením ztrát dosáhneme během 9 příštích let úplného vrácení investovaných prostředků do výměny. Vzhledem k životnosti transformátorů považuji tuto investici za opodstatněnou a vhodnou pro lokální distribuční síť letiště.

6 Závěr a zhodnocení

Cílem této práce byl výpočet zkratových poměrů a zkratových výkonů na všech rozvodnách LDS Letiště Ostrava a.s. a stanovení rozdílu ztrát při provozování kabelů na různých napěťových hladinách. Teoretická část se zabývá problematikou distribučních sítí, dimenzování vedení a výpočtům ztrát. Praktická část je zaměřena na LDS Letiště Ostrava a.s. V první kapitole praktické části je popsán současný stav LDS. Druhou kapitolu tvoří výpočet zkratových poměrů a zkratových výkonů na jednotlivých rozvodnách. Souhrn vypočtených zkratových proudů a výkonu je v tabulce č. 5.

Rozvodna	Z_k	I_k''	S_{ks}
	[Ω]	[kA]	[MVA]
HTS16kV	0,802	4,75	49,36
TR22	1,645	2,30	23,90
TR26	0,992	4,70	48,84
TR3	1,236	3,08	32,04
TR38	1,465	2,60	27,00
TR28	1,657	2,29	27,02
TR2	1,227	3,10	32,21
TR23	0,991	3,85	40,00
TSC25	1,159	3,46	39,95
TR24	2,240	1,70	17,67
TR5	1,332	2,86	29,73

Tabulka č. 5 souhrn vypočtených hodnot

Další kapitola praktické části počítá ztráty na vybraných přírodních vodičích do rozvodu. V tabulce č. 6 jsou uvedené jednotlivé vypočtené hodnoty ztrát.

Kabel	Rozvodna	P _p	Ztrátové výkony	
			ΔP_{6kV}	ΔP_{22kV}
		[kW]	[kW]	[kW]
ANTKOYPV 3x95	TR3	750	15,70	1,17
ANTKOYPV 3x25	TR22	350	5,07	0,38
ANTKOYPV 3x25	TR23	300	3,72	0,28
ANKTOYPV 3x185	TR26	900	7,25	0,55
ANKTOYPV 3x95	TR2	700	17,31	1,28
Celkem ztrátový výkon			49,05	3,65

Tabulka č. 6 vypočtené hodnoty ztrát

Jak je vidět z tabulky ztráty při napětí 22kV, jsou 13,44 nižší než při napětí 6kV. Výpočet odpovídá teoretické hodnotě 13,5 menších ztrát u těchto dvou napěťových hladin. Rozdíl je dán zaokrouhlováním. Při přepočtu na spotřebovanou energii za rok zjistíme, že Letiště Ostrava a.s. může ušetřit až 304451,4 Kč ročně, pokud by LDS provozovalo na 22kV.

Ve čtvrté praktické kapitole jsou vypsána doporučení pro LDS Ostrava a.s. Letišti je doporučeno pokračovat ve výměně zastaralých zařízení v rozvodnách, výměně nevyhovujících kabelů a přípravě na provozování dvoupaprskové sítě s paralelním provozem dvou transformátorů 5000kVA. Byl proveden výpočet investice do výměny všech transformátorů a příslušenství, aby mohla být síť provozována na napětí 22kV. Celková částka činí 2 500 000 Kč. Tato částka by se Letišti Ostrava a.s. vrátila do 9 příštích let, jelikož by došlo k uspoření nákladů na provoz sítě.

Touto diplomovou prací jsem se zdokonalil ve výpočtu zkratových poměrů na praktickém příkladu LDS Letiště Ostrava a.s a uvědomil si rozdíl v provozování sítí na různých hladinách napětí především z hlediska ztrát a nákladů na samotný provoz sítě. Při stále rostoucích cenách energií bude v budoucnu pro Letiště Ostrava a.s důležité, aby kladlo důraz na co nejmenší provozní náklady při zachování stejného standardu pro uživatele služeb letiště.

Použitá literatura

- [1] Hodinka M., Fecko Š., Němeček F. : Přenos a rozvod elektrické energie
/ SNTL Praha 1989
- [2] Pavlovský P. : Elektrické sítě v městech a sídlištích
/ SNTL Praha 1975
- [3] Gurecký J. : Přenos a rozvod elektrické energie
/Učební texty/ VŠB-TU Ostrava 2007
- [4] ČSN EN 60909-0, Zkratové proudy v trojfázových soustavách – výpočet proudů
/ČSN EN/ 2002
- [5] Projektová dokumentace letiště Ostrava a.s
- [6] BEZ [online]. 2000 [cit. 2011-05-03]. BEZ transformátory. Dostupné z WWW:
<<http://www.bez.sk/transformatory/>>.
- [7] Santarius, P. : Elektrické stanice a vedení, 2. vydání, VŠB-TUO, 2002, ISBN 80-248-0175-2
- [8] Místní bezpečnostní předpis průmyslová zóna Mošnov trafostanice 22/6kV ozn. HTS1
- [9] ČEPS a.s. [online]. 2008 [cit. 2011-05-03]. ČEPS a.s. Dostupné z WWW:
<<http://www.ceps.cz/>>.

Seznam příloh

- I. Schéma lokální distribuční sítě pro výpočet zkratových poměrů